

CAPÍTULO 3

HORMIGÓN ARMADO PROYECTADO VS HORMIGÓN ARMADO CONVENCIONAL

3.1.-INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se pretende dar una visión general de las principales variaciones que introduce el sistema de proyección por vía húmeda en las propiedades mecánicas y de durabilidad en un elemento de hormigón armado.

Inicialmente se consideran los efectos generales que induce la proyección en el material, evaluando la variación de diferentes propiedades en estado fresco así como fenómenos asociados a la propia aplicación. Posteriormente se evalúan las propiedades del material en estado endurecido. En este sentido se pretende determinar de forma cualitativa, a falta de una campaña experimental que lo respalde, los efectos que tiene sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad la aplicación del hormigón mediante proyección en relación a la colocación tradicional (moldes de encofrado y vibrado).

Por último se procede de forma análoga en lo que concierne a aspectos relacionados con la durabilidad en la solución con hormigón armado proyectado, prestando especial énfasis en la materialización de los recubrimientos así como las consideraciones oportunas referentes a condicionantes de carácter estético y de acabado.

Para llevar a cabo el análisis de los distintos parámetros será habitual a lo largo del texto establecer comparaciones constantes entre hormigón armado proyectado y hormigón armado convencional.

3.2.-LA PROYECCIÓN COMO TÉCNICA DE APLICACIÓN

La proyección del material a alta velocidad sobre grandes superficies confiere a esta técnica de puesta en obra numerosas ventajas respecto a la colocación habitual (moldeado y vibrado) ya que por un lado permite eliminar todas las tareas relacionadas con el encofrado a través de un fraguado casi instantáneo y por otro elimina las tareas derivadas de la compactación del hormigón produciéndose esta última por un efecto de impacto contra el soporte.

En este sentido no es de extrañar que en muchas situaciones resulte en clara desventaja la aplicación convencional respecto a la proyección, ya sea por condicionantes de espacio, por criterios estéticos o simplemente por minimizar el coste de ejecución a base de reducir el plazo de construcción.

Si bien, la perfección no existe y, no todo son bondades en el hormigón proyectado, de modo que existen una serie de características intrínsecas a la propia técnica que influyen significativamente en la mezcla y que abordamos a continuación.

3.2.1.-Porosidad y Peso específico

Quizás el aspecto más destacado en lo que a la proyección se refiere, sea la incorporación de aire. Este elemento que actúa como propulsor de la mezcla, erigiéndose como medio de transporte y de colocación del hormigón, introduce en el hormigón un volumen de aire que no se presenta en hormigones convencionales.

Otro ítem que no podemos olvidar cuando hablamos de hormigón proyectado es el rebote, fenómeno por el cual la mezcla de áridos, agua, cemento y adiciones al ser impulsada a gran velocidad e impactar contra la superficie de proyección experimenta un rebote como consecuencia de dicho impacto, produciendo notables diferencias entre el hormigón colocado y el amasado.

La acción conjunta de aire incorporado al hormigón en estado fresco y rebote de material (especialmente el de mayor tamaño) revierte en un mayor volumen de huecos en la mezcla, configurándose un hormigón en estado endurecido con una mayor porosidad y por tanto con un menor peso específico.

3.2.2.-Esqueleto granular

Hemos visto en el capítulo 2 como la proyección requiere de unos tamaños y coeficientes de forma de los áridos determinados para evitar las obstrucciones que se pueden producir en la boquilla y evitar orientaciones que darían lugar a comportamientos anisótropos de la mezcla.

De este modo, el tamaño máximo del árido se encontrará acotado por el tamiz por el cual pasa más del 90% del peso, recomendándose un tamaño que no exceda los 12mm. Tamaños superiores a los señalados podrían producir problemas durante la ejecución al constituir un componente de potencial bloqueo de la boquilla. En este

sentido, al aumentar el tamaño del árido, aumenta el rebote repercutiendo negativamente sobre la eficiencia de la ejecución y, consecuentemente, en el coste de la obra.

Las limitaciones en cuanto al tamaño máximo de árido se refiere configuran un esqueleto granular del material con un bajo contenido de fracción gruesa, lo que proporciona al hormigón proyectado módulos de deformación menores a los obtenidos en un hormigón tradicional.

Las diferencias principales consisten en tamaños máximos de árido menores (máximo 12mm) así como una mayor fracción de finos. En este orden de cosas es importante destacar que los valores de resistencia alcanzados en hormigones proyectados son análogos a los de un hormigón convencional con la salvedad de que el tamaño máximo del árido es bien diferente con todo lo que implica en términos de rigidez.

3.2.3.-Contenido de pasta y relación agua/cemento

La relación agua/cemento tiene una importancia decisiva en las resistencias mecánicas y de durabilidad de cualquier hormigón. (figura 3.1)

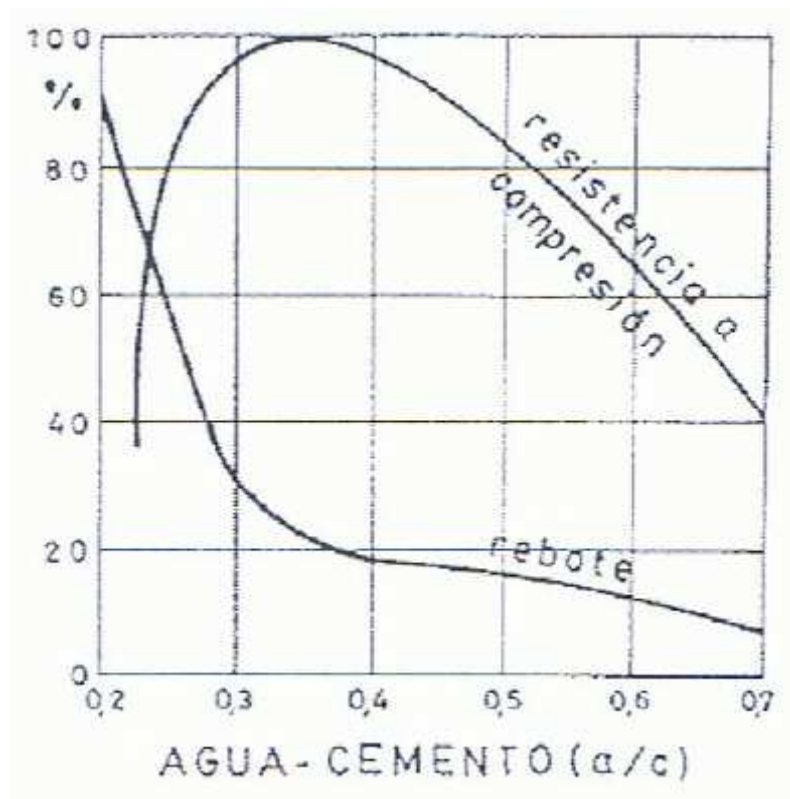


Figura. 3.1. Curva resistencia-rebote-relación agua/cemento.

La puesta en obra del hormigón proyectado conlleva en el hormigón colocado un enriquecimiento relativo de cemento, dado que el material que rebota es, fundamentalmente, el de mayor peso y corresponde a las fracciones más gruesas del esqueleto granular del árido utilizado.

En esta dirección un hormigón con un mayor contenido de cemento como es el hormigón proyectado tendrá un relación agua/cemento menor (0,35-0,45), en cualquier caso inferior a los máximos especificados en la actual EHE para cualquier ambiente de exposición en un elemento armado. Si bien este parámetro no compromete las características mecánicas del elemento (resistencia principalmente), no podemos decir lo mismo en lo que respecta a durabilidad ya que una relación agua/cemento menor, conduce a una mayor retracción plástica del material, pudiendo dar lugar a una fisuración inicial excesiva con sus consiguientes efectos sobre la resistencia a la penetración de agentes agresivos.

Con el fin de minimizar el efecto de la alta demanda de agua asociada al alto contenido de cemento de la mezcla se perfilan como alternativa los reductores de retracción que actúan reduciendo la tensión superficial del agua existente en los poros del hormigón y, consecuentemente reduciendo las tensiones capilares que se producen a nivel intersticial.

3.2.4.-Efecto Pantalla

En el caso de hormigones proyectados armados, la presencia de armadura supone siempre un efecto pantalla frente a la trayectoria del hormigón, lo que puede favorecer, con altas densidades de armadura, zonas de menor adherencia entre el hormigón y el acero, fruto de la aparición de bolsas de lechada inducidas por la acción concomitante del rebote y el efecto pantalla.

Este efecto será propio de hormigones proyectados ya que en hormigones convencionales el material es vertido en moldes de encofrado, llevándose a cabo la compactación mediante vibradores mecánicos que garantizan la correcta distribución del material alrededor de las armaduras.

3.2.5.-Adherencia al soporte

Será fundamental en elementos de hormigón armado proyectado, en los que dispondremos habitualmente de una o ninguna cara de encofrado, garantizar una adecuada adherencia entre el soporte y el material de proyección.

En ocasiones el soporte que recibirá el material será una estructura de hormigón que configurará la cara posterior, en otras en cambio será el propio terreno una vez finalizada la excavación, pero siempre deberemos garantizar que las fuerzas de adherencia que se desarrollan en el contacto hormigón proyectado-soporte, sean mayores que el peso propio del material proyectado, evitando de este modo desprendimientos.

Es pues responsabilidad del proyectista evaluar la necesidad de aplicar tratamientos previos sobre el soporte en aras a garantizar la movilización de las anteriormente citadas fuerzas de adherencia.

En este sentido es determinante el espesor de capa a ejecutar, no recomendándose espesores mayores a 20cm. Lógicamente cualquier sección estructural tendrá un espesor mayor lo que obligará a ejecutarla si se opta por la proyección en distintas fases. Es evidente que una ejecución por capas genera juntas frías en el hormigón lo que ocasiona un comportamiento diferente de la sección respecto a una ejecución en una sola fase con hormigón convencional.

En esta situación será fundamental asegurar, entre las distintas capas que conforme la sección, la movilización del esfuerzo rasante necesario para que haya una correcta transmisión de los esfuerzos. Sólo de este modo se podrá asegurar la rigidez y el monolitismo de la sección.

Este aspecto será tanto más crítico en ambientes agresivos o en situaciones por debajo del nivel freático, en las que haya que garantizar una determinada impermeabilidad y protección frente a agentes agresivos.

Resulta evidente que esta peculiaridad no se presentará en elementos de hormigón convencional en los que la sección se ejecutará en una sola fase más allá de su espesor.

3.3.-EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGÓN ARMADO PROYECTADO

3.3.1.-Peso específico

Se ha comentado cómo el proceso de proyección, a través de la introducción de aire en el hormigón y el rebote que experimentan generalmente los áridos más gruesos, da lugar un hormigón con una mayor porosidad y un menor peso específico.

El efecto de un hormigón más poroso y con un menor peso específico tiene una significación directa en el cálculo de la sección de hormigón armado proyectado ya que de este parámetro dependerán en gran medida las acciones de peso propio. Ni que decir tiene que en muchas ocasiones el efecto del peso propio es el verdadero limitante en lo que a dimensionamiento de secciones se refiere, siendo las solicitaciones que produce las que mayor efecto tienen sobre las tensiones y las deformaciones.

Si asumimos normalmente en el cálculo que el peso específico de un hormigón armado convencional está en torno a los 25KN/m³, en el caso del hormigón proyectado podemos situar la media alrededor de los 22KN/m³.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuatro dosificaciones de hormigón proyectado ensayadas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (figura 3.2), en el marco de la ejecución del nuevo Tunnel de Vielha-Juan Carlos I, inaugurado a finales de 2007.

DOSIFICACIÓN	H1	H2	H3	H4
Cemento I52,5R (en Kg/m ³)	425	390	410	376
Agua (en lit/m ³)	179	179	150	150
Arena 0/3 mm (en Kg/m ³)	348	348	150	150
Arena 0/6 mm (en Kg/m ³)	1184	1184	1245	1245
Grava 6/12 mm (en Kg/m ³)	295	295	465	465
Microsílice (en Kg/m ³)	0	35	0	34
Fluidificante Melcret 97-3 (1,2 g/cm ³) (en l/m ³)	8	8	8	8
Suma (en Kg/m ³)	2431	2431	2420	2420
Acelerante Delvocrete Activ S-80° (en l/m ³)	12	12	12	12

Tabla. 3.1.- Dosificaciones teóricas contempladas en el estudio

En la tabla superior puede apreciarse la presencia de dos dosificaciones con humo de sílice: H2 y H4, que corresponden, respectivamente, a un sustitución del 8% del peso de cemento sobre H1 y H3 respectivamente.

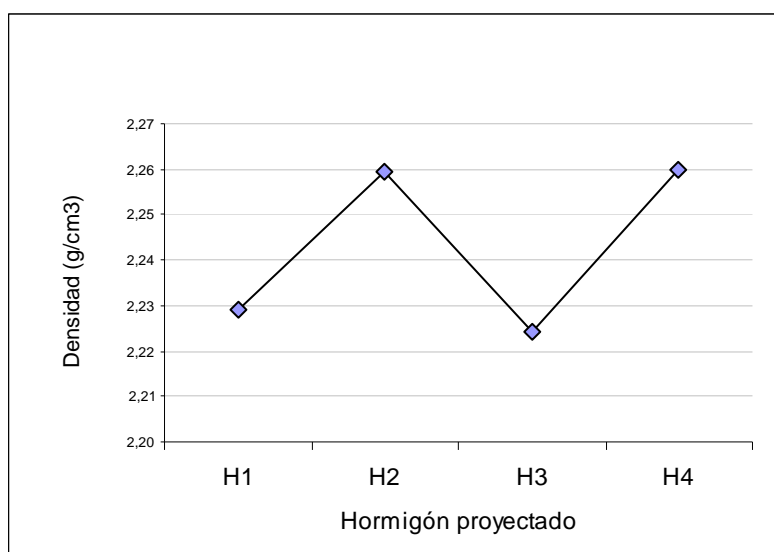


Figura. 3.2. Densidad hormigón proyectado

A la vista de los resultados anteriores se observa cómo el valor de la densidad se mantiene bastante centrado en torno a 22KN/m³, manifestándose una mayor densidad en las dosificaciones que incorporaban humo de sílice. Ya se ha comentado el efecto de esta adición, tan presente en los hormigones proyectados, como agente amplificador de la compacidad y la resistencia.

Referente a la presencia de un mayor volumen de poros, podemos situar valores medios de porosidad en hormigón armado proyectado en torno al 15-20%, siendo muy superiores a los alcanzados en hormigones armados vibrados (5-10%).

En la tabla inferior se muestran los valores promedio de porosidad obtenidos en las dosificaciones anteriormente mencionadas.

H1	H2	H3	H4
15%	14%	15%	14%

Tabla. 3.2. Porosidad en hormigón proyectado

En virtud de los resultados obtenidos se constata como la porosidad del hormigón proyectado es superior a la del hormigón convencional debido a la acción conjunta de aire y rebote asociados al propio proceso. Se manifiesta una porosidad ligeramente menor en la dosificación H2 y H4, correspondientes a la propuestas que incorporaban humo de sílice como sustitución parcial de cemento.

3.3.2.-Consistencia

Si bien este parámetro corresponde a una propiedad en fresco del material, se recoge en este apartado como elemento que forma parte de la tipificación de un hormigón estructural.

Se define la consistencia de un hormigón como la aptitud por la cual conserva las posiciones relativas de sus componentes en estado fresco. En este sentido se trata de un parámetro no significativo desde un punto de vista estructural ya que regula el estado del hormigón fresco y que, en cualquier caso, es susceptible de ser controlado adoptando la proporción adecuada de plastificante.

3.3.3.-Resistencia a compresión

La resistencia del hormigón depende fundamentalmente de tres factores: esqueleto granular, contenido mínimo de cemento y relación agua/cemento

Se ha contrastado en hormigones proyectados como la adecuada elección del tamaño máximo de sus áridos, acorde a valores que optimicen la compacidad del esqueleto, no compromete los valores de resistencia que obtenemos habitualmente en hormigones vibrados convencionales, entendidos en este caso como hormigones de resistencia normal. ($\leq 35\text{MPa}$)

En este sentido, la elección de áridos con un tamaño inferior a 12mm para lograr una proyección sin obstrucción no es impedimento para alcanzar los valores mínimos de resistencia establecidos por la actual instrucción en función de la clase de exposición.

La puesta en obra del hormigón proyectado conlleva en el hormigón colocado un enriquecimiento relativo de cemento, dado que el material que rebota es

fundamentalmente, el de mayor peso y corresponde a las fracciones más gruesas del esqueleto granular del árido utilizado, con lo que no supone una limitación importante el contenido mínimo de cemento.

Dicho contenido está ligado a aspectos de durabilidad en tanto que vincula el ambiente y desde un punto de vista de, resistencia a la agresividad, no debemos olvidar que el hormigón proyectado al ser más poroso resulta más permeable a la entrada de agentes externos.

Recordamos en este punto que valores elevados del contenido de cemento no conllevan, necesariamente, un aumento significativo de la resistencia y pueden dar lugar a efectos secundarios derivados del aumento de temperatura durante el fraguado: mayor retracción plástica además de un mayor coste económico. Es por este motivo que la actual EHE limita superiormente el contenido de cemento a 500Kg/m³.

En el caso de utilizar hormigón proyectado se parte de contenidos de cemento superiores a los establecidos para cualquier hormigón armado (250-350 kg/m³). El hecho de aportar más cemento revierte en un hormigón con mayor retracción plástica, con un mayor coste por metro cúbico en el suministro pero con un coste de colocación menor si tenemos en cuenta los altos rendimientos que permite la proyección.

El hormigón armado convencional adquiere valores de resistencia con menores contenidos de cemento ya que no se ve tan condicionado por el tamaño de los áridos ni por las pérdidas de cemento que se producen asociadas al rebote en el hormigón proyectado. Este aspecto hace que el hormigón armado convencional sea, desde un punto de vista de fabricación, más económico, y será ya, una cuestión de rendimientos en la colocación lo que permitirá decantar la balanza hacia un lado u otro estableciendo como más competitivo el que proporcione un menor coste económico por metro cúbico colocado.

Dado que la medida por excelencia para determinar la resistencia a compresión del hormigón es la rotura de probetas, se adjunta a continuación los resultados experimentales obtenidos en las dosificaciones anteriormente mencionadas, correspondientes a diferentes hormigones proyectados por vía húmeda, todos ellos de resistencia característica 30MPa y que fueron ensayados en el contexto de construcción del sostenimiento del Túnel de Vielha.

En la tabla 3.3 se presentan los resultados de las resistencias medias obtenidas en los testigos extraídos de las artesas proyectadas.

DOSIFICACIÓN	H1	H2	H3	H4
f_{cm} (MPa)	34,8 (13,1%)	40,5 (14,7%)	33,2 (9,3%)	47,2 (7,9%)

Tabla. 3.3.- Resistencias obtenidas en hormigón proyectado

A la vista de los resultados anteriores se constata como en cualquiera de las dosificaciones consideradas el contenido de cemento está muy por encima de los mínimos exigidos incluso para un ambiente muy agresivo como sería el Qc ($>350\text{Kg/m}^3$), sin sobrepasar el umbral de los 500Kg/m^3 y que podría ocasionar fisuración a tempranas edades fruto de una retracción excesiva con sus posteriores consecuencias en tanto en cuanto a penetración de agentes agresivos.

Dado que la docilidad de la mezcla se logra en el caso del hormigón proyectado a base de superplastificantes: mayores contenidos de cemento revierten en relaciones agua/cemento más bajas y por tanto en la mayoría de los casos nos situaremos en torno a 0,35-0,45, valores inferiores a los máximos establecidos en la tabla 37.3.2a de la actual EHE 08. Estas relaciones agua/cemento son ligeramente inferiores a las que se consideran en un hormigón convencional ya que interesa una mezcla lo más cohesiva posible sobre la que no se produzca segregación y con capacidad de adquirir cierta resistencia inicial a tempranas edades evitando posibles desprendimientos

Podemos concluir que desde un punto de vista de resistencia, las prestaciones que ofrece un elemento de hormigón armado convencional respecto a un armado proyectado son análogas ya que se puede alcanzar el mismo valor de resistencia característica aplicando cualquiera de las dos técnicas.

En referencia a la evolución de la resistencia, podemos decir que en la aplicación mediante proyección, la eliminación de encofrado se logra fundamentalmente a través del efecto de los acelerantes de fraguado, los cuales permiten un endurecimiento casi instantáneo del hormigón. Dentro del campo de los acelerantes se habían utilizado tradicionalmente los basados en aluminatos o silicatos, logrando proyectar con éxito grandes espesores en superficies verticales o bóvedas. Cabe destacar que esta tipología de acelerantes presenta un efecto secundario sobre el valor de la resistencia a largo plazo. Gracias al desarrollo de una nueva generación de acelerantes libres de álcalis se logran efectos análogos a base de una mayor dosificación de acelerante sin pérdidas de resistencia a largo plazo.

La utilización de hormigones convencionales, en ausencia de acelerantes de fraguado en la mayoría de situaciones da lugar a cinéticas de crecimiento más lentas a tempranas edades con gradientes mayores a partir de los 7 días. En la figura 3.3 se muestran los datos obtenidos en tres dosificaciones ensayadas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras: la primera corresponde a un hormigón convencional de 30Mpa de resistencia característica donde podemos ver como la evolución a tempranas edades es lenta y no es hasta una edad en torno a los 7 días que el material adquiere una resistencia en torno al 50% de la característica. Las otras dos dosificaciones corresponden a hormigones autocompactables con un contenido de cemento más próximo al que dispondríamos en un hormigón proyectado.

Destacamos en este punto la dificultad de realizar un estudio en el que se evalúe la resistencia del hormigón proyectado con la edad, ya que como parámetro de control se utilizaría la rotura de probetas a compresión, siendo necesario extraer testigos de artesas a muy tempranas edades.

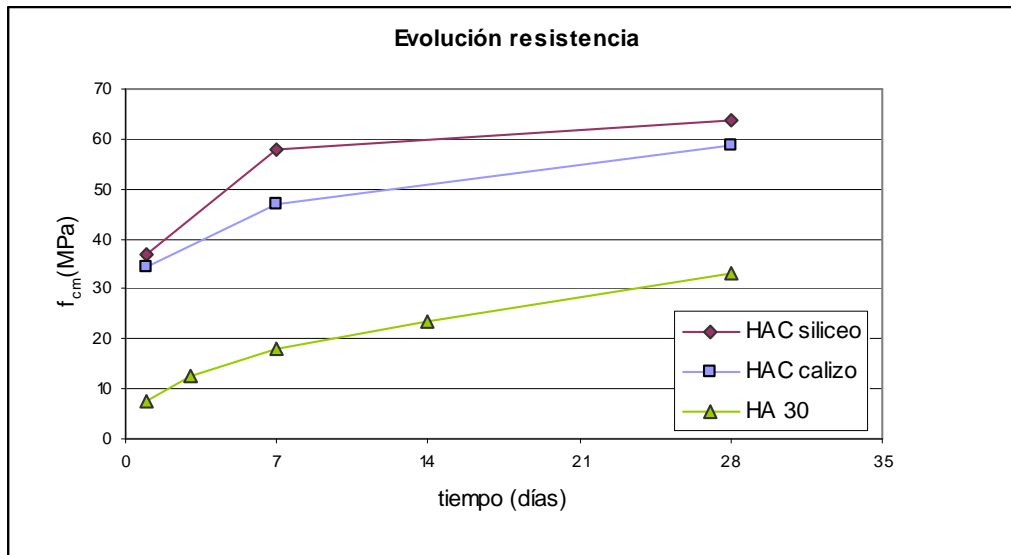


Figura.3.3. Evolución resistencia en distintos hormigones

El tema de las cinéticas de crecimiento de la resistencia es fundamental en el hormigón proyectado ya que la transferencia de esfuerzos debidos a la acción si quiera del peso propio se produce de forma casi instantánea en el momento de la aplicación.

En este sentido cabe destacar también en elementos de hormigón armado proyectado la importancia de garantizar una buena adherencia entre hormigón y acero, rodeando con el material de proyección las jaulas de armado a fin de evitar la formación de bolsas de lechada.

3.3.4.-Deformación elástica y módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la característica del hormigón relacionada con su rigidez. En un material elástico, el módulo de elasticidad E , es una característica del material que define la relación entre la tensión aplicada, σ , y la deformación del material, ϵ .

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

En el caso de un material perfectamente elástico, la curva tensión-deformación es lineal y la trayectoria es la misma durante el ciclo de carga y descarga. El hormigón en sus distintas formas de aplicación (proyectado, moldeado, autocompactable...) no es un material perfectamente elástico, pero sí se comporta de forma elástica hasta un cierto grado.

Normalmente se considera la deformación del hormigón durante el tiempo de carga como deformación elástica instantánea y la deformación posterior, debida a las cargas sostenidas, como fluencia.

En la figura 3.4 se muestra una representación esquemática de la relación tensión-deformación de hormigón.

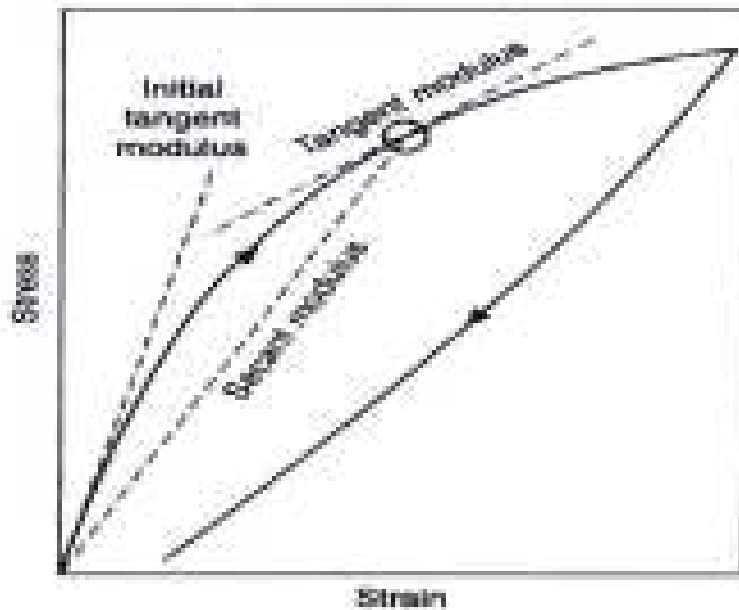


Figura. 3.4. Diagrama tensión deformación del hormigón

Debido a que la curva tensión-deformación del hormigón no es lineal y que el módulo de elasticidad varía en función del nivel de carga (módulo tangente), existen varias fórmulas para definir el módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad inicial tangente es el que corresponde a la parte lineal de la curva. Este valor corresponde a un comportamiento perfectamente elástico y ocurre en niveles de carga y deformaciones muy bajos. Otro tipo es el módulo secante, también llamado módulo estático, que corresponde a la pendiente de la recta secante en el diagrama σ - ϵ . El módulo secante está relacionado con el nivel de carga aplicado y se determina experimentalmente, en general a un tercio de la de la tensión correspondiente a la resistencia media.

Hay que tener en cuenta que las deformaciones y la curvatura de la curva tensión-deformación dependen de la velocidad de aplicación de la carga. Así, las deformaciones y la curvatura disminuyen si la velocidad de aplicación aumenta.

Considerando el hormigón como un material compuesto fundamentalmente por dos fases, matriz de pasta de cemento y esqueleto granular, el módulo de elasticidad depende de las características individuales de cada fase y de sus proporciones en la mezcla.

En la figura 3.5 podemos ver la curva tensión deformación de los tres implicados, siendo la tangente de la curva correspondiente al hormigón mayor que la de la pasta y menor que la correspondiente a los áridos.

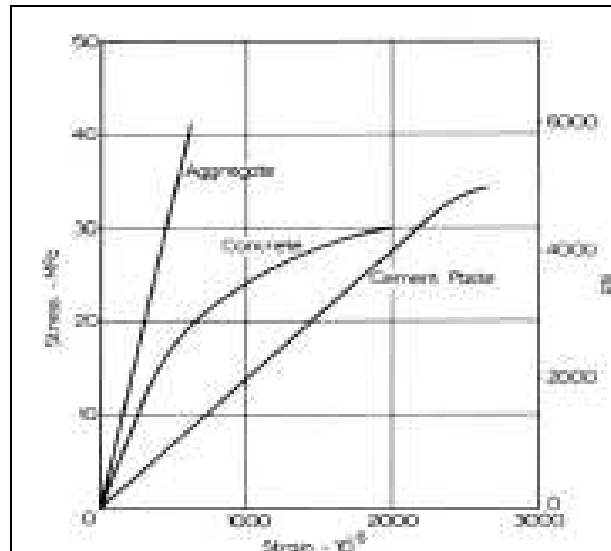


Figura. 3.5. Relación tensión deformación de la pasta, árido y hormigón

Los módulos de elasticidad de la pasta y el árido son lineales y dependen de las características específicas de cada material. En general, el módulo de elasticidad del hormigón es menor que el del árido y mayor que el de la pasta. El comportamiento no lineal del módulo de elasticidad del hormigón se debe a la formación de microfisuras en la zona de transición entre árido y pasta.

Se muestran a continuación valores típicos de módulo de elasticidad del hormigón y sus componentes:

- Árido grueso: 70-140 GPa en función de la naturaleza
- Pasta de cemento: 7-28 GPa
- Hormigón: 14-42 GPa

Los parámetros que determinan el módulo de elasticidad son de forma simplificada:

- ✓ Módulo de elasticidad de la pasta y volumen de pasta en la mezcla.
- ✓ Módulo de elasticidad del árido y volumen del árido en la mezcla.
- ✓ Zona de transición entre árido y pasta.

El factor más importante que determina el módulo de elasticidad de la pasta es su porosidad. Se puede relacionar el módulo de elasticidad de la pasta y la porosidad utilizando la siguiente expresión:

$$E_p = E_g \cdot (1 - P_c)^3$$

donde:

E_p es el módulo de elasticidad de la pasta.

E_g es el módulo de elasticidad de la pasta endurecida con porosidad igual a 0.

P_c es la porosidad expresada en tanto por uno.

En la figura inferior se puede observar la relación entre módulo de elasticidad de la pasta y porosidad, dependiendo, principalmente, esta última en hormigones convencionales de la relación agua/cemento.

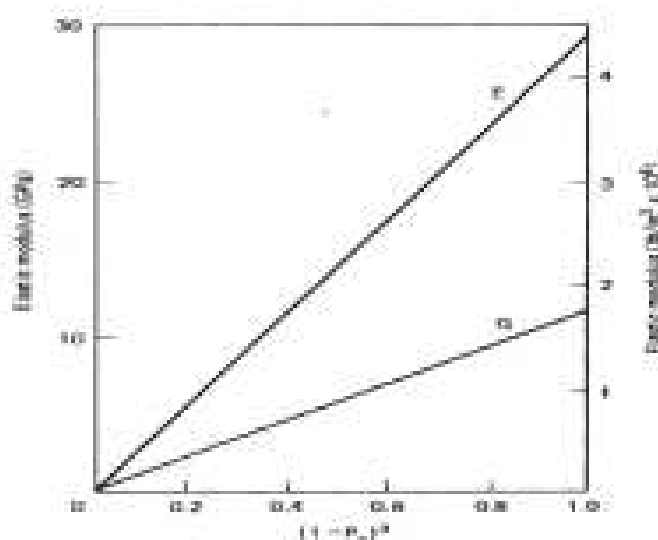


Figura.3.6. Influencia de la porosidad de la pasta en el módulo de la misma

En el hormigón proyectado la relación agua/cemento es menor que en hormigones convencionales y si bien es cierto que el alto volumen de adiciones contribuye a aumentar el módulo de elasticidad de la pasta, el aumento en contenido de pasta respecto al volumen total hace que el módulo sea inferior. Si a este efecto añadimos la mayor porosidad presente en el hormigón proyectado colocado fruto del fenómeno acoplado de aire y rebote, constatamos que el módulo de deformación del hormigón armado proyectado será menor que el del hormigón convencional.

Igualmente, el contenido de árido fino es predominante con el fin de reducir el rebote que se produce al impactar contra la superficie a proyectar y, ya hemos visto como el módulo de deformación depende de la rigidez del esqueleto granular siendo mayor cuanto mayor sea la rigidez y el tamaño de los áridos. En este sentido cabe esperar a igualdad de contenidos de cemento y relación agua/cemento, valores de módulo de deformación menores a los de un hormigón convencional.

El tercer factor en condicionar el módulo de elasticidad del hormigón es la zona de transición entre pasta y árido. Se trata de la zona más débil de cualquier hormigón y por tanto su influencia sobre el comportamiento mecánico del mismo es fundamental.

En general, la zona de transición contiene un mayor volumen de huecos que el resto de pasta, y es precisamente aquí donde se producen las primeras microfisuras en el hormigón. El comportamiento no lineal del hormigón se debe en gran parte a la formación de estas microfisuras y su forma de propagarse.

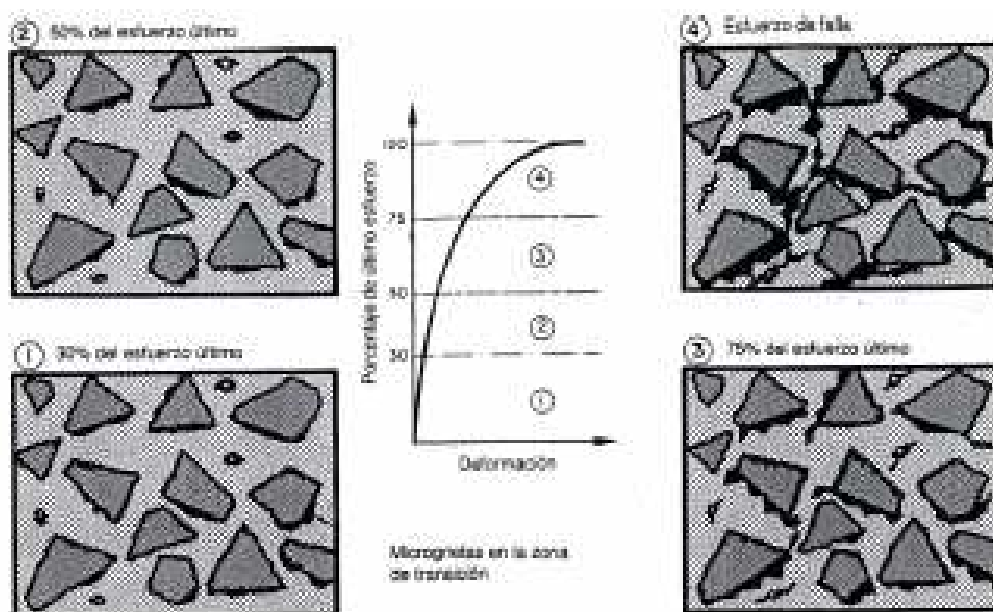


Figura. 3.7. Comportamiento esfuerzo deformación bajo compresión uniaxial

En la figura superior se puede observar el desarrollo de las microfisuras alrededor del árido con el aumento de la tensión aplicada. Cabe destacar que la microfisuración en el hormigón juega un papel importantísimo en las deformaciones por fluencia que veremos más adelante.

A diferencia del hormigón convencional, en el hormigón proyectado no existen formulaciones de carácter general que relacionen el módulo longitudinal con la resistencia media que estén universalmente asumidas, tal y como sucede para el hormigón vibrado (módulo secante y módulo tangente).

A continuación se muestran los resultados del módulo de deformación obtenidos para los hormigones proyectados citados anteriormente de forma experimental, así como la comparación con el valor que cabría esperar para un módulo secante calculado según la siguiente expresión:

$$E_j = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

donde : E_j es el módulo secante a la edad j

$f_{cm,j}$ es la resistencia media del hormigón a la edad j

DOSIFICACIÓN	H1	H2	H3	H4
E (GPa) (EHE)	27,7	29,2	27,3	30,7
E (GPa) (Testigos)	26,5 (8,3%)	27,4 (6,3%)	25,3 (13,7%)	27,4 (8,1%)

Tabla. 3.4. Valores del módulo obtenidos experimentalmente y según EHE 08

A la vista de la formulación presentada en la actual instrucción se observa una relación directa entre resistencia media del hormigón a compresión y módulo pero no vincula en ningún momento el parámetro deformacional con muchos de los aspectos que introduce la proyección del material: mayor porosidad, mayor contenido de pasta, menor proporción de árido grueso en la mezcla, etc.

Se puede observar como respecto al valor que cabría esperar, se producen variaciones a la baja que se sitúan entre un 3% y un 11% respecto a un hormigón vibrado.

Desde el presente estudio se propone para el cálculo del módulo de deformación longitudinal del hormigón armado proyectado la siguiente expresión:

$$E_j^p = \frac{E_j}{\gamma^p}$$

donde: E_j^p corresponde al módulo de deformación del hormigón proyectado.

E_j es módulo de deformación secante para hormigón convencional de igual resistencia a la edad j .

γ^p es un coeficiente reductor que varía entre 1,03 y 1,15.

En lo que respecta al módulo de deformación, la solución estructural con hormigón armado proyectado ofrece una rigidez menor que la solución con hormigón armado convencional. Este efecto es consecuencia del mayor volumen de pasta y finos, mayor porosidad asociada a la incorporación de aire y rebote, y menor proporción y tamaño de árido grueso.

Se recuerda que una reducción del módulo en torno al 10% mejora la ductilidad de la sección, reduciendo la susceptibilidad del hormigón a fisurarse, aspecto especialmente importante en elementos comprimidos.

3.3.5.-Retracción

Se define la retracción como el fenómeno por el cual se produce una pérdida de agua en el hormigón, estando el agua presente en el seno de la matriz conglomerante en cinco estados (en forma de gel, intersticial formando meniscos, intercrystalina, combinada y libre).

Los factores principales que influyen en el fenómeno de la retracción son los siguientes:

- Grado de humedad: a mayor humedad menor retracción
- Tipología de cemento: presentan mayor retracción aquellos que gozan de mayor resistencia

- Cantidad de finos: la retracción aumenta a medida que lo hacen los finos.
- Agua de amasado: a medida que aumenta el agua de amasado, aumenta la retracción ya que queda un mayor volumen de agua libre.
- Superficie del elemento: siendo mayor cuánto más área de disipación existe.
- Presencia de armadura: la retracción disminuye a medida que aumenta la cuantía de armadura

La instrucción española EHE recomienda una formulación empírica para calcular la retracción (apartado 39.7). Se trata de una adaptación del modelo propuesto en el CEB-FIP 90 con algunas modificaciones. A continuación se presentan los parámetros necesarios en el cálculo según el modelo anteriormente mencionado:

- Edad del hormigón al comienzo de la retracción, t_s .
- Edad del hormigón en el instante de carga, t_0 .
- Humedad relativa, en %, HR.
- Resistencia media a compresión del hormigón en MPa a la edad de 28 días, f_{cm} .
- Espesor medio en mm, e .
- Edad del hormigón en el momento de evaluación, t .

Tal y como sucedía con la expresión del módulo elástico, la formulación actual recogida en la inmensa mayoría de normas se refiere a hormigones convencionales, no teniendo en cuenta la necesidad de poder estimar parámetros de diseño como módulo, deformación por retracción y fluencia en estructuras ejecutadas con hormigón en el que se hayan utilizado otras técnicas de aplicación.

En este sentido se han publicado recientemente estudios, Agranati, G (2008), para evaluar la retracción y fluencia en hormigones en los que la colocación lleva asociada una compactación, me estoy refiriendo a los cada vez más utilizados hormigones autocompactables.

De la publicación de dichos estudios se desprende que no es necesario modificar los modelos actuales de cálculo de retracción y fluencia para hormigones autocompactables, pero hay que tener en cuenta que la precisión de dichos modelos es limitada y se afecta por unos coeficientes correctores.

El hormigón proyectado se asemeja bastante más al hormigón autocompactable que un a un hormigón convencional ya que ambos se caracterizan por un esqueleto granular con menor presencia de árido grueso en relación a la fracción fina y mayores contenidos de pasta asociados a un mayor contenido de cemento. Cabe decir en relación a la porosidad que los valores obtenidos en hormigón autocompactable son menores lógicamente a los que se producen en el hormigón proyectado.

Siguiendo esta línea, y a falta de una campaña experimental, que respalde el estudio, se utilizarán en el cálculo de retracción y fluencia en hormigón armado proyectado, los mismos modelos que para el hormigón convencional afectados por los coeficientes propuestos para HAC.

Quiero destacar en relación a este último punto que la retracción es un fenómeno a largo plazo y que la duración de los ensayos de retracción influye directamente sobre los valores obtenidos experimentalmente. Es decir que de cara a una campaña experimental sería necesaria una base de datos de hormigones suficientemente amplia en cuanto a composiciones, condiciones de ensayo...

A modo de ejemplo se propone lo siguiente: calcular la retracción para una sección de hormigón armado convencional de 60cm de espesor y 30MPa de resistencia característica a la edad de 365 días. Adicionalmente, estimar la retracción a la misma edad y para idéntica sección y resistencia, materializada mediante hormigón proyectado, relativa a la aplicación de los anillos de refuerzo en la estación de metro de La Torrassa en la Línea 9 del Metro de Barcelona.

Para ello se adjunta a continuación el modelo de cálculo empleado en la EHE 08, pese a que de los considerados en el trabajo “Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de fluencia y retracción al hormigón autocompactable”, Agranati, G, 2008 se evidencia como el que mayor imprecisión alcanza.

No obstante se aplica en este estudio el correspondiente a la EHE 08 ya que a la hora de evaluar la retracción en fase de proyecto, aspectos como la dosificación final o la relación agua/cemento, involucrados en otros modelos más complejos, son todavía desconocidos, en contra de la resistencia a compresión que será el único dato conocido.

La retracción total está compuesta por la retracción autógena y retracción de secado. La deformación de retracción autógena se desarrolla durante el endurecimiento del hormigón, mientras que la retracción por secado se desarrolla lentamente.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

donde: ε_{cd} Deformación de retracción por secado.
 ε_{ca} Deformación de retracción autógena.

La componente de secado puede calcularse a lo largo del tiempo como:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \cdot k_e \cdot \varepsilon_{cd,\infty}$$

donde:

t Edad del hormigón en el instante de evaluación, en días.
 t_s Edad del hormigón al comienzo de la retracción, en días.
 β_{ds} Coeficiente evolución temporal que se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{e^3}}$$

e Espesor medio en milímetros.

$$e = \frac{2 A_c}{u}$$

- A_c Área de la sección transversal.
 u Perímetro en contacto con la atmósfera.
 k_e Coeficiente que depende del espesor medio.

e (mm)	k_e
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$\varepsilon_{cd\infty}$ Coeficiente de retracción a tiempo infinito que se obtiene como:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{HR}$$

Para estructuras al aire ($HR < 99\%$):

$$\beta_{HR} = -1,55 \left(1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right)$$

Para estructuras sumergidas ($HR \geq 99\%$):

$$\beta_{HR} = 0,25$$

HR Humedad relativa en tanto por ciento.

$$f_{cm0} = 10 \text{ N/mm}^2$$

α_{ds1} y α_{ds2} dependen de la velocidad de endurecimiento del cemento

	Endurecimiento lento	Endurecimiento normal	Endurecimiento rápido
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

A modo de resumen, la EHE 08 adjunta en la tabla 39.7.c los valores de deformación de retracción para distintos valores de las variables involucradas, tomando como origen el final del curado a los siete días y para un hormigón con resistencia característica 30MPa.

Tabla 39.7.c Valores de la retracción [10^{-6}]

t [días]	Humedad relativa [%]					
	50		70		90	
	Espesor medio [mm]					
	50	600	50	600	50	600
14	-186	-30	-146	-29	-76	-28
30	-332	-46	-258	-43	-126	-37
90	-455	-84	-352	-74	-170	-55
365	-513	-177	-397	-145	-193	-88
1825	-529	-305	-409	-242	-198	-129
10000	-532	-369	-412	-289	-199	-149

El valor de deformación por retracción por tanto para la sección propuesta, considerando una humedad relativa del 70% será de $-145 \cdot 10^{-6}$ mm tal y como se muestra en la tabla superior.

Atendiendo a los coeficientes correctores encontrados en la bibliografía de referencia se propone, como una primera estimación a falta de ensayos para acabar de calibrar el modelo, la siguiente expresión para hormigones autocompactables que por analogía será equivalente a la que se produciría en la sección de hormigón armado proyectado.

$$\varepsilon_{cs}^p = \varepsilon_{cs} \cdot \partial^p$$

Donde: ε_{cs}^p es la retracción total en hormigón convencional.

∂^p es un coeficiente corrector de la retracción para HAC que varía entre 1,07 y 1,2.

En el caso de la solución adoptada en los pozos de la Línea 9 se obtiene de aplicar directamente lo anterior un valor en torno a $-165 \cdot 10^{-6}$ mm.

A pesar de que el propio proceso de colocación en el hormigón proyectado confiere a la mezcla un enriquecimiento relativo de cemento y por tanto una relación agua/cemento inferior a las habituales en hormigones vibrados, el efecto combinado del cemento así como una mayor presencia de finos (mayor contenido de pasta) implica una mayor retracción plástica del material. No debemos olvidar tampoco que el cemento utilizado generalmente en hormigones proyectados es de alta resistencia y endurecimiento rápido, factor que condiciona en gran medida el valor de la retracción.

Los efectos de la retracción tienen un eco sobre la durabilidad del material ya que una fisuración excesiva a tempranas edades supone una pérdida de la resistencia a la agresividad de agentes externos.

A falta de ensayos específicos sobre este fenómeno, podemos concluir que a efectos de retracción, ésta será mayor en el hormigón armado proyectado que en el hormigón armado convencional, ya que se trata de un fenómeno que afecta a la pasta de cemento y el volumen de pasta es mayor en el hormigón proyectado.

3.3.6.-Fluencia

Entendido el fenómeno de fluencia como el conjunto de deformaciones diferidas en el tiempo bajo carga constante, se recogen a continuación los principales factores que influyen en el proceso en cualquier hormigón:

- Condiciones termohigrométricas: a mayor humedad menor deformación plástica diferida.
- Características del hormigón: a mayor resistencia menores deformaciones por fluencia.
- Edad del hormigón en el momento de puesta en carga: a tempranas edades se obtienen mayores deformaciones por fluencia que si el hormigón tiene más edad en el momento de la puesta en carga.
- Duración de la carga: mayor duración conlleva mayor deformación (límite de fluencia)
- Cuantía de armadura: el hecho de armar el hormigón favorece la disminución de este proceso.

Así el condicionante más importante será el alto contenido de cemento en un hormigón proyectado respecto a un vibrado de modo que cabe esperar valores de fluencia mayores en la solución con proyectado. Además el efecto de la transmisión de carga, casi inmediata en ausencia de encofrado a muy tempranas edades es propio de hormigones proyectados.

A falta de datos experimentales, se adjunta continuación una primera aproximación de la fluencia en un hormigón proyectado de igual resistencia característica a un vibrado procediendo de forma análoga al apartado 3.3.5 referente a estimación de la retracción.

Se adjunta a continuación el modelo planteado en la actual EHE 08 para determinar la fluencia del hormigón.

La deformación dependiente de la tensión, en el instante t , para una tensión constante $\sigma(t_0)$, menor que $0,45 f_{cm}$, aplicada en t_0 , puede estimarse de acuerdo con el criterio siguiente:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma(t_0) \left(\frac{I}{E_{c,t_0}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right)$$

donde t_0 y t se expresan en días.

El primer sumando del paréntesis representa la deformación instantánea para una tensión unidad, y el segundo la de fluencia, siendo

- E_{c28} Módulo de deformación longitudinal instantáneo del hormigón, tangente en el origen, a los 28 días de edad, definido en 39.6.
 $E_{c,t0}$ Módulo de deformación longitudinal secante del hormigón en el instante t_0 de aplicación de la carga, definido en 39.6.
 $\varphi(t, t_0)$ Coeficiente de fluencia.

El coeficiente de fluencia puede obtenerse mediante la siguiente formulación:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t - t_0)$$

donde:

φ_0 Coeficiente básico de fluencia, dado por la expresión:

$$\varphi_0 = \varphi_{HR} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

siendo:

φ_{HR} Coeficiente de influencia de la humedad relativa (HR):

$$\begin{aligned} \varphi_{HR} &= 1 + \frac{1 - HR/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{e}} & \text{si } f_{cm} \leq 35 \text{ N/mm}^2 \\ \varphi_{HR} &= \left[1 + \frac{1 - HR/100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{e}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 & \text{si } f_{cm} > 35 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$\beta(f_{cm})$ Factor que permite tener en cuenta el efecto de la resistencia del hormigón en el coeficiente básico de fluencia:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{ck} + 8}} \quad f_{ck} \text{ en N/mm}^2$$

$\beta(t_0)$ Factor de influencia de la edad de carga (t_0) en el coeficiente básico de fluencia.

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}}$$

$\beta_c(t - t_0)$ Función que describe el desarrollo de la fluencia con el tiempo.

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

siendo:

$$\begin{aligned} \beta_H &= 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot HR)^{18} \right] e + 250 \leq 1500 & f_{cm} \leq 35 \text{ N/mm}^2 \\ \beta_H &= 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot HR)^{18} \right] e + 250 \leq 1500 \cdot \alpha_3 & f_{cm} > 35 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

y donde α_1 , α_2 , α_3 tienen en cuenta la influencia de la resistencia del hormigón.

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$

La EHE 08 presenta para las distintas variables involucradas el valor del coeficiente de fluencia calculado a la edad de 10.000 días para un hormigón de resistencia característica 30MPa (Tabla 39.8.a).

Edad de puesta en carga t ₀ [días]	Humedad relativa [%]					
	50		70		90	
	Espesor medio [mm]					
	50	600	50	600	50	600
1	5,6	3,8	4,3	3,3	3,1	2,7
7	3,9	2,7	3,0	2,3	2,1	1,9
14	3,4	2,3	2,6	2,0	1,9	1,7
28	3,0	2,0	2,3	1,7	1,6	1,5
60	2,6	1,8	2,0	1,5	1,4	1,3
90	2,4	1,6	1,9	1,4	1,3	1,2
365	1,8	1,2	1,4	1,1	1,0	0,9
1800	1,3	0,9	1,0	0,8	0,7	0,7

Retomando el ejemplo de los anillos de la Línea 9 del Metro de Barcelona se obtiene a tenor de lo anterior, para una puesta en carga a partir de 28 días, un valor del coeficiente de fluencia, tomando una HR del 70% , de 1,7.

Operando de forma análoga al apartado anterior se plantea una primera aproximación al coeficiente de fluencia en hormigón armado proyectado del siguiente modo:

$$\varphi_{(t,t_0)}^p = \varphi_{(t,t_0)} \cdot \xi$$

donde: $\varphi_{(t,t_0)}^p$ se define como coeficiente de fluencia en hormigón proyectado

$\varphi_{(t,t_0)}$ se define como coeficiente de fluencia en hormigón convencional

ξ es un factor corrector del coeficiente de fluencia, aplicado al coeficiente de fluencia calculado para un hormigón convencional de igual resistencia característica y cuyo valor varía entre 1,07 y 1,2.

En este sentido para un hormigón armado proyectado de 30MPa con una sección de 60cm, HR del 70% y puesta en carga a los 28 días, se obtiene un coeficiente de fluencia del orden de 1,87.

Como conclusión, fruto de una revisión actualizada, de los principales métodos aplicados para la determinación de fluencia, se puede decir que dicho fenómeno es extremadamente complejo de cuantificar y a día de hoy todavía no son completamente comprendidos los mecanismos que lo causan.

Dicho esto, para un hormigón de igual resistencia característica, cabe esperar valores mayores del coeficiente de fluencia en el caso de hormigón armado proyectado en relación al hormigón convencional, esto se justifica en base al mayor volumen de pasta presente en el primero, fruto del enriquecimiento de cemento que se produce al impactar contra el soporte, como consecuencia del rebote. Así, hormigones con un mayor contenido de cemento experimentarán, a igualdad de otros parámetros, deformaciones por fluencia mayores.

En cualquier caso, una adecuada determinación del fenómeno pasaría por reconsiderar los modelos utilizados actualmente, de cara a poder desarrollar alguno que permitiera introducir datos experimentales obtenidos a tempranas edades.

3.3.7.-Adherencia hormigón-acero

En relación a los aspectos asociados a la adherencia entre el hormigón y el acero en elementos de hormigón armado proyectado cabe decir que son de compleja caracterización, y una evaluación de los mismos requeriría abordarse mediante un estudio específico.

Se ha comentado el efecto pantalla que ejerce la armadura frente a la trayectoria del hormigón, siendo responsabilidad del operario gunitador, la variación del ángulo y la distancia de proyección para asegurar una correcta adherencia alrededor de toda la armadura. En este sentido la existencia de zonas densamente armadas puede dar lugar a zonas con menor adherencia entre el hormigón y el acero, fruto de la aparición de bolsas de lechada inducidas por la acción conjunta del rebote y del efecto pantalla.

En esta dirección son de práctica habitual en las aplicaciones con hormigón proyectado, sustituciones parciales de cemento por microsílice. La adición de humo de sílice reduce considerablemente el rebote mejorando la adherencia del material al soporte.

3.3.8.-Coeficiente de Poisson

Expresa la relación entre deformación longitudinal y transversal por efecto de la carga aplicada. El valor del mismo como en cualquier hormigón varía a medida que aumenta la carga, aumentando significativamente para cargas próximas a la rotura. Para deformaciones elásticas bajo tensiones normales de utilización la instrucción española aconseja tomar como valor medio $\nu=0,2$.

Se muestran a continuación una serie de medidas experimentales realizadas sobre las dosificaciones anteriormente citadas en el texto, relativas al hormigón utilizado en el Túnel de Vielha sobre testigos extraídos en dirección axial al hormigonado y transversal a la misma. A la vista de los resultados se observa cierta tendencia en todas ellas a presentar valores inferiores al reflejado en la instrucción para hormigones convencionales, lo cual significaría valores mayores de deformación en la dirección transversal.

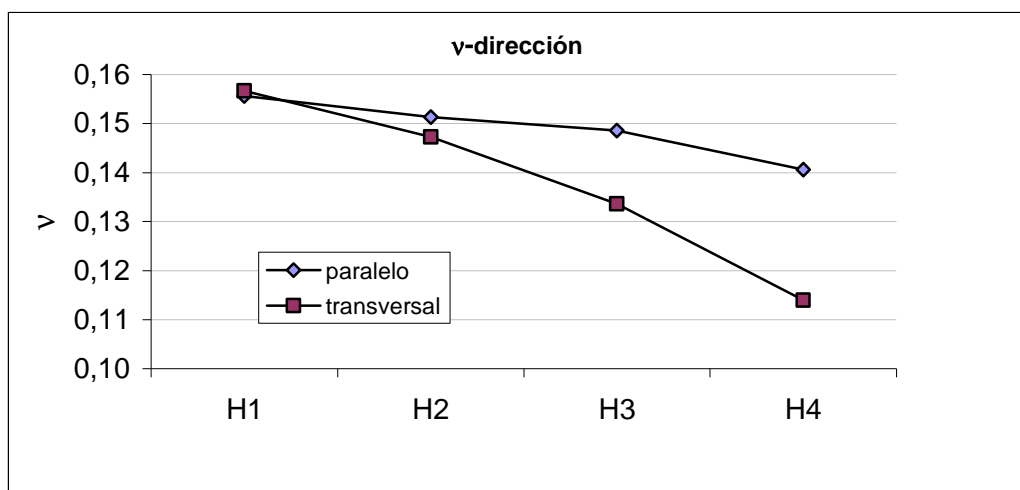


Figura. 3.8. Coeficiente de poisson

3.3.9.-Coeficiente de dilatación

El coeficiente de dilatación térmica lineal expresa la deformación unitaria que se produciría por cada incremento de temperatura. Como aspecto relevante, destacar la importancia de que se muestre próximo al de los otros componentes de la sección, concretamente del acero para evitar que se produzcan tensiones internas que podrían ocasionar daños en la interfase de ambos materiales.

Este coeficiente depende de la naturaleza del cemento, de los áridos, de la dosificación y de las dimensiones de la sección.

La propia instrucción EHE aconseja tomar un valor igual a $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ pese a destacar que este coeficiente puede variar en una porción relativamente elevada (del orden de ± 30 por 100), con lo que se considera desde este estudio analizar el efecto mediante una campaña experimental sobre muestras de hormigón proyectado.

3.3.10.-Durabilidad

En lo que a durabilidad se refiere, se seguirán los mismos criterios establecidos que en el hormigón armado convencional. En este sentido, será fundamental garantizar contenidos mínimos de cemento y relaciones máximas agua/cemento en aras a garantizar una compacidad en el hormigón que propicie una adecuada protección frente a la agresividad físico-química de los agentes agresivos, especialmente en la zona de piel del elemento estructural. Adicionalmente se dispondrán los recubrimientos nominales establecidos en la EHE 08, en función de la clase de exposición y el nivel de control establecido.

Se ha comprobado como el contenido de cemento en cualquier dosificación de hormigón proyectado es, a igualdad de resistencia y otros factores, superior al empleado en el hormigón convencional. Este efecto se debe al enriquecimiento de cemento que se produce durante la proyección con el fin de absorber las diferencias entre material amasado y material colocado por la acción del rebote.

Respecto a la relación agua/cemento cabe destacar que debido al incremento de cemento en relación a un hormigón convencional para lograr la misma resistencia, será en general inferior a la de este último, estableciéndose como valores de referencia, relaciones agua cemento en torno a 0,35-0,45, inferiores en cualquier caso a los fijados en la tabla 37.2.3.a. de la instrucción.

Con el objetivo de garantizar la geometría y recubrimientos nominales establecidos será necesario un nivel de control intenso durante la ejecución. En este sentido y dado que la proyección del material podría producir movimiento en los separadores tradicionalmente utilizados en hormigón moldeado, se dispondrá otro sistema para materializar dichos recubrimientos.

Un sistema sencillo es la utilización de clavos galvanizados, perfectamente fijados a la armadura para evitar movimientos de los mismos durante la proyección y dispuestos estratégicamente para garantizar la geometría de la sección (canto) y los recubrimientos nominales exigidos.

Asumido el hecho de que el hormigón proyectado será, como consecuencia del aire incorporado y el rebote, un material con mayor porosidad y por tanto con una menor resistencia a la penetración de agentes agresivos; cabe preguntarse si es necesario adaptar el valor de los recubrimientos nominales, incrementándolos en el caso del hormigón armado proyectado.

A fin de dar respuesta a este último punto, la instrucción EHE establece en el artículo 37.3.3, el siguiente comentario: *La forma más adecuada de reducir los ataques al hormigón es conseguir que sus poros ocupen el menor volumen posible y formen una red capilar poco intercomunicada. Este es el objetivo que se pretende conseguir mediante los requisitos de contenido de agua y de cemento recogidos en el articulado. Al no haber métodos normalizados para el control de estos contenidos, se necesita recurrir a otras comprobaciones de carácter indirecto a través de ensayos de comportamiento como el de penetración de agua que se propone en el articulado.*

En esta dirección se adjuntan en la tabla inferior los valores obtenidos en el ensayo de penetración de agua bajo presión así como el intervalo considerado en la actual EHE en función del ambiente.

	Profundidad de penetración máxima (mm)		Profundidad de penetración media (mm)	
	Valor medido	EHE 08	Valor medido	EHE 08
H1	65	30-50	53	20-30
H3	65		53	
H4	65		47	

Tabla. 3.5. Valores profundidad penetración agua en hormigón proyectado

Se observa, a la vista de los resultados obtenidos, como en todas las muestras se produjeron valores medios y máximos de penetración de agua superiores a los establecidos en el artículo 37.3.3. En base a esto y a sabiendas de que no únicamente la permeabilidad influye en los procesos de degradación del hormigón, se concluye que las prestaciones en lo que respecta a durabilidad en un elemento de hormigón armado proyectado no son equivalentes al hormigón armado convencional.

De cara a establecer una solución equivalente al hormigón convencional se proponen a continuación diversas alternativas para el hormigón armado proyectado.

- Una primera idea sería aumentar los recubrimientos mínimos exigidos, ya sea a base de mayores secciones de hormigón o bien mediante la aplicación de un mortero de acabado sin contribución estructural en la parte externa.
- Alternativamente se pueden adoptar soluciones drenantes en el contacto de la cara posterior de la sección de hormigón armado proyectado.

Merece la pena destacar la dificultad de materializar los recubrimientos mínimos, no tanto en la cara desde la cual se realizará la proyección, como en la cara posterior, en contacto con elementos de hormigón previamente ejecutados o bien directamente con el terreno. En este sentido el difícil acceso a la cara posterior se postula como un inconveniente adicional, recayendo sobre el operario encargado de controlar el robot de proyección la responsabilidad de garantizar los mínimos exigidos, pero no habiendo forma de comprobarlos debido a la imposibilidad de acceder a la cara posterior. Este problema no se produce en elementos de hormigón convencional, a menos que sean muros hormigonados a una cara contra el terreno y en los que por su geometría (cantos reducidos) no permitan el acceso a los operarios responsables de vibrar el hormigón.

3.3.11.-Acabados

Se recogen en este último apartado aspectos más bien estéticos y de terminación asociados a una ejecución con hormigón armado proyectado.

La ejecución del elemento armado mediante hormigón proyectado comporta asimismo aspectos específicos asociados a la ejecución por capas de un espesor determinado que permita materializar el canto contemplado en el cálculo sin que se produzcan desprendimientos del material por falta de adherencia. En este sentido se aconsejan espesores máximos en torno a los 20cm por aplicación, pudiendo repetirse tantas veces como sean necesarias para garantizar el espesor exigido a la sección.

En el caso general de tener que materializar una sección de hormigón con armadura en varias capas (p.e. una próxima al paramento base y otra correspondiente al paramento externo), será habitual que el operario encargado de realizar la proyección varíe la distancia y ángulo de proyección, acercando la boquilla de proyección para alcanzar la cara posterior, rodeando con el hormigón la armadura. Ello supone un efecto de impacto sobre el acero pasivo que puede llegar a provocar movimientos y cambios en la posición del armado, con la consecuente incidencia en el canto útil de la sección estructural; resultando especialmente crítico en estas situaciones asegurar la correcta sujeción de la armadura previamente a la proyección del hormigón.

Será fundamental, al no disponer de elementos de encofrado que garanticen la geometría de la sección, llevar un control exhaustivo (por ejemplo mediante clavos) así como una cuidadosa ejecución en todo momento.

Si bien podemos alcanzar cualquier espesor final a base de ejecutar por capas, no es menos cierto que la aplicación en fases genera juntas frías según sean las distintas direcciones de proyección, lo que da lugar a un comportamiento monolítico diferente en el elemento estructural en relación al hormigón vibrado y encofrado. En este sentido se perfila de suma importancia en el caso del hormigón proyectado asegurar una correcta adherencia entre capas, con el fin de que se movilice el esfuerzo rasante necesario para considerar la sección colaborante.

Otro aspecto a destacar respecto al hormigón encofrado es el nivel de acabado de la sección siendo en la solución proyectada no uniforme y rugoso pudiendo favorecer una mayor retención de polvo y suciedad, lo que puede redundar, a medio plazo, en un mayor coste de mantenimiento por tratamientos posteriores de limpieza en fase de explotación. Para paliar este efecto así como asegurar una mayor impermeabilidad a la penetración de agentes externos se puede realizar un enfoscado con el propio material en estado fresco tras la proyección. Otra alternativa sería la aplicación de morteros de reboco o acabado sin contribución estructural en la parte externa. La adopción de éste tratamiento estético supondría un efecto favorable en términos de durabilidad pese a que no puede considerarse bajo ningún concepto en términos de asegurar la geometría y recubrimiento de la sección.

La solución con hormigón armado proyectado se perfila como una alternativa al hormigón armado moldeado en aquéllos casos donde no es determinante un nivel de acabado visto, ya que permite obtener altos rendimientos. En este sentido la adopción de tratamientos estéticos se ve claramente compensada al eliminar las tareas de encofrado, máxime cuando se trate de encofrados curvos como en la aplicación concreta de la Línea 9.

En el caso concreto de la Línea 9, la solución a base de proyección permite conjugar excavación y hormigonado, eliminando los riesgos asociados a posibles movimientos de los paneles de encofrado durante las tareas de vertido y vibrado.

Cada vez más se encuentra presente el hormigón proyectado en elementos estructurales como son anillos de refuerzo de pantallas continuas o pantallas de pilotes. En terrenos muy rígidos con presencia de roca a poca profundidad, la simbiosis de pantalla de pilotes y anillo de refuerzo sin encofrar se perfila como una solución de menor coste y mayor rapidez de ejecución que las faraónicas perforaciones en roca con hidrofresas o maquinaria especial.